

# 风干污泥修复后淋洗液对黑麦草初期生长与重金属富集的影响

沈志平, 多立安, 赵树兰\*

(天津师范大学生命科学学院, 天津市动植物抗性重点实验室, 天津 300387)

**摘要:**采用不同浓度 DTPA 强化修复风干污泥中的重金属, 之后对基质进行淋洗, 以获得的淋洗液培植黑麦草, 研究了淋洗液对黑麦草初期生长及重金属富集的影响。结果表明, 淋洗液中含有丰富的无机矿质元素, 能够满足植物的生长需要。与对照相比, 修复过程中  $20 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  DTPA 未种植物处理的淋洗液显著抑制黑麦草的萌发, 推迟黑麦草萌发的高峰期, 且降低了黑麦草的地上生物量, 其余处理的萌发数与对照差异不显著。各处理淋洗液培养的黑麦草在叶绿素含量上较对照有不同程度的增加, 其中  $10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  DTPA+隔层处理的淋洗液较对照提高了 91.2%。在对重金属的富集中, 各处理淋洗液培植的黑麦草地上部和根部的 Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 的浓度显著提高, 尤其  $20 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  DTPA 未种植物处理要显著高于对照和其他淋洗液处理。对于同一金属而言, 同一处理下根部浓度要远远高于地上部。相同处理下, 黑麦草地上部对不同重金属富集系数表现为 Zn 最大, Pb 最小, 根部则表现为 Cd、Pb 较大, Zn 较小, 且 Zn 从地下向地上的转运能力最强。和其他 4 种重金属相比, 黑麦草对 Zn 具有较强的吸收潜力, 可作为 Zn 污染土壤植物修复的备选植物。

**关键词:** 风干污泥; 淋洗液; 黑麦草; 初期生长; 重金属富集

中图分类号: X503.233 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)05-0937-07 doi:10.11654/jaes.2013.05.009

## Effects of Air Dried Sewage Sludge Leachate After Remediation on Initial Growth and Heavy Metal Accumulation of *Lolium perenne*

SHEN Zhi-ping, DUO Li-an, ZHAO Shu-lan\*

(College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In our previous study, a column experiment with horizontal permeable barriers was conducted to investigate DTPA-assisted phytoextraction of heavy metals by turfgrass from air dried sludge and associated heavy metal leaching. Thus, large amounts of leachates contained excessive heavy metals were obtained. In order to avoid the leachate pollute the environment and to utilize it, *Lolium perenne* was cultivated by the leachates and the effects of the leachates on initial growth and heavy metal accumulation were investigated. The results showed that the leachates were rich in inorganic mineral nutrients for plant growth. Compared to the control, the leachate obtained from the treatment of  $20 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  DTPA in the absence of turfgrass planting significantly inhibited seed germination, delayed germination peak and decreased aboveground biomass. But there was no significant differences between other treatments and control. All leachate treatments significantly increased chlorophyll content, which is increased by 91.2% in the leachate from the treatment of  $10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  DTPA in the presence of barrier. For heavy metal accumulation, the leachates significantly increased Cd, Cr, Cu, Zn and Pb concentrations in turfgrass shoots and roots, especially the treatment of  $20 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  DTPA in the absence of turfgrass planting. With respect to the same metal, metal concentration in root was higher than that in shoot under the same treatment. The bioconcentration factor (BCF) of heavy metals for shoots showed the biggest for Zn and smallest for Pb. However, BCF for roots showed higher for Cd, Pb and lower for Zn. Also, zinc showed strong transfer ability from root to shoot among the five metals. It was considered that relative to the other four heavy metals, *Lolium perenne* could be selected as a potential candidate for the phytoextraction of soil contaminated with Zn.

**Keywords:** air dried sewage sludge; leachate; *Lolium perenne*; initial growth; heavy metal accumulation

收稿日期: 2012-09-03

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目(09ZCGYSH02100)

作者简介: 沈志平(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为污染生态学。

\* 通信作者: 赵树兰 E-mail: skyzsl@mail.tjnu.edu.cn

城市污泥是指城市污水处理过程中产生的固体废物,是城市污水处理厂的经常性产物<sup>[1]</sup>。随着我国城市化进程的加快和人口的增加,城市污泥的产生量与日俱增。污泥中含有多种植物所需的营养元素及大量的有机质,如不加以利用会造成资源的浪费。因此,将污泥农用或用于城市园林绿地已成为污泥处置的重要途径之一<sup>[2-4]</sup>。但是污泥中同时含有有害物质,如重金属、细菌、病原微生物等,处理不当会造成环境污染<sup>[5]</sup>。污泥中重金属含量是土壤背景值的几倍到几十倍,土地利用后,其中的重金属也会随之进入土壤环境,改变了土壤环境中原有重金属含量<sup>[6]</sup>。螯合剂可以通过与土壤溶液中的重金属离子结合,改变重金属在土壤中的存在形态,使重金属从土壤颗粒表面解吸,从而大大活化土壤中的重金属,为淋洗或植物的吸收创造有利条件<sup>[7]</sup>。Andrew Hong 等<sup>[8]</sup>研究了 DTPA 作为淋洗剂修复重金属污染的土壤以及在修复过程中 DTPA 的生物稳定性,表明 DTPA 是和 EDTA 一样具有强螯合作用和重复利用性的螯合剂。

近些年来,尽管无土栽培技术在农业栽培各个领域发展很快,但在草皮生产中的应用仍处于研究阶段;此外,现有无土栽培营养液不但制备具有一定难度,而且价格较高<sup>[9]</sup>。前期实验中,在草坪建植体系下,通过施加不同浓度的 DTPA 以及设置隔层对风干污泥重金属进行修复,已取得良好的实验预期效果,10 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA 协同由沸石、蛭石和玉米芯组成隔层对污泥中重金属的修复效果最好,黑麦草中重金属的富集最多。考虑到利用 DTPA 强化植物修复的同时会造成重金属的淋溶,实验中设置了隔层,在植物收获后模拟降水条件对污泥进行淋洗,通过对淋洗液中重金属进行分析,表明隔层的存在阻碍了重金属向下迁移,在此淋洗过程中产生了大量的淋洗液。由于淋洗液中含有重金属及其他有害成分,不能直接排放到环境中,有必要对淋洗液进行处理及循环利用,且淋洗液中也含有植物所需的多种营养物质,若能将其回收作为无土栽培营养液,进行草皮培植,则无疑是一条利用途径<sup>[9]</sup>。因此,将前期实验中施加不同处理 DTPA 修复污泥后所获得的淋洗液代替营养液进行黑麦草培植,在修复风干污泥重金属的基础上,进一步研究淋洗液作为草皮培植无土营养液对黑麦草初期生长的影响及黑麦草对淋洗液中重金属富集的规律,目的在于为风干污泥重金属修复过程中淋洗液的合理利用提供依据,在进行污泥修复的同时,又可获得草皮无土栽培基质,节省宝贵的土壤资源,具有一定的实

践应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

选用多年生黑麦草(*Lolium perenne*)为实验植物;污泥采自天津纪庄子污水处理厂,自然条件下风干。

### 1.2 淋洗液的获得

在前期的污泥重金属修复研究中,共设 6 个处理,分别为:0 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA+黑麦草(Ⅰ);10 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA+黑麦草(Ⅱ);20 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA+黑麦草(Ⅲ);10 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA+隔层+黑麦草(Ⅳ);20 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA+隔层+黑麦草(Ⅴ);20 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA 无植物(Ⅵ)。

实验容器为内径 11 cm 的 PVC 管,下端封以一层棉布和尼龙网,在高 20 cm 的 PVC 管中首先装入 1000 g 风干的园土,铺平,再装入 750 g 混合基质(风干污泥和园土的质量比为 1:2,充分混合后高度为 8 cm),铺平于园土之上;在高 24 cm 的 PVC 管园土和混合基质间加一隔层(40 g 蛭石+40 g 沸石+40 g 60 目玉米芯)。除了处理Ⅵ不种植物外,其余 5 个处理的 PVC 管中均播种 1.0 g 黑麦草种子,用自来水浇灌。培养期间正常供水,以维持植物生长所需。黑麦草播种 30 d 后,将浓度分别为 0、10、20 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA 溶于蒸馏水施于混合基质表面。10 d 后将草刈割,其后第 2 d 用 300 mL 人工酸雨进行第一次淋洗。本实验参考了天津地区 6、7 月份的日降水情况,以 4 年的日最大降水量为日浇灌量,采用模拟集中降水的淋洗法,研究了螯合诱导修复过程中重金属的淋滤行为。根据天津市降水 pH 值调查,属酸性降水,年均值为 5.59。本实验配制 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>浓度分别为 14.96、6.54、1.68、3.71、0.82、1.38、0.64、0.78 mg·L<sup>-1</sup> 的模拟雨水,并用 HCl 调 pH 为 5.59。在第一次淋洗之后,每 7 d 淋洗一次,每次 300 mL,共淋洗 5 次,收集淋洗液备用。

### 1.3 研究方法

培养容器为直径 10.0 cm 的培养皿,底部铺一层滤纸。实验选用上述获得的 6 个处理淋洗液培养黑麦草,淋洗液的浓度为 5%(将 10 mL 的原液配成 200 mL),对照采用 Hoagland's 营养液。选取籽粒饱满、大小均匀的黑麦草种子 200 粒播于每一培养皿中,每一处理 3 次重复。通过每天的水分管理保证基质水分条件,并保持到试验结束,每天根据蒸发量加入相同体积的淋洗液。实验在实验室内的植物培养台上进行,

温度为 16~22 ℃,相对湿度为 36%~57%,光照条件为自然入射光,试验期为 30 d。

1.4 指标测定

种子萌发指标的测定:待黑麦草种子萌发后,每日记录萌发数,直至萌发稳定,连续观测 8 d。播种后 30 d 收获,进行地上生物量的测定,将其地上部刈割后称鲜重,再将其置于烘箱中,80 ℃条件下烘干至恒重。叶绿素含量的测定:称取 0.2 g 鲜草样,采用丙酮-乙醇混合液法于 633 nm 和 645 nm 波长下比色,计算叶绿素含量<sup>[10]</sup>。重金属含量的测定:准确称取 0.1 g 左右干草样,用硝酸:高氯酸:硫酸(8:1:1)消解后,所得溶液用蒸馏水定容至 25 mL;淋洗液用 HNO<sub>3</sub> 和 HClO<sub>4</sub> 在 120~140 ℃下消化,所得溶液用蒸馏水定容到 50 mL,最后利用 TAS-990 原子吸收分光光度计测定消化液中重金属(Cu、Cd、Cr、Pb 和 Zn)含量。

1.5 数据处理

采用 SPSS11.5 软件对所得数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 淋洗液的背景分析

淋洗液背景值见表 1。淋洗液含有丰富的矿质营养元素,能够满足草坪植物生长所需,且 Na、Ca 和 Mg 含量也较高<sup>[11]</sup>。淋洗液中同一重金属的浓度在不同处理下差异明显,各个处理的淋洗液中重金属含量与处理 VI(对照组)相比,10 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA 协同由沸石、蛭石和玉米芯组成隔层对风干污泥中的重金属的修复最为有效,且对阻碍重金属向下迁移最为显著。参照国家关于地下水质量的标准(GB/T 14848—

1993),本实验淋洗液重金属含量均属于 V 类水质,Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 5 种重金属含量均超标,因此淋洗液若不经处理直接排放到环境中去,势必会对地下水 and 深层土壤造成污染。

2.2 淋洗液处理对黑麦草种子萌发动态的影响

所有处理的黑麦草在播种 4 d 后开始萌发,8 d 后基本达到稳定(表 2)。在播种后 4~6 d,各淋洗液处理种子萌发数要少于对照营养液处理,尤其是在污泥修复过程中 20 mmol·kg<sup>-1</sup> DTPA 未种植物获得的淋洗液处理 VI,显著低于对照( $P<0.05$ ),其他各淋洗液处理间差异不显著。播种后 7~11 d,除处理 VI 外,其他各淋洗液处理的种子萌发数与对照比较差异不显著。萌发稳定时,处理 VI 种子萌发数比对照组下降了 18%,表明该处理淋洗液对黑麦草种子的萌发有着明显的抑制作用。

2.3 淋洗液处理对黑麦草地上生物量及叶绿素的影响

各不同淋洗液处理下,黑麦草地上生物量(干重)见表 3。方差分析表明,除处理 VI 显著低于对照( $P<0.05$ )外,其他各淋洗液处理与对照间差异不显著,各淋洗液处理间也无显著差异。

叶绿素含量是反映草坪观赏性能和生长状态的重要指标<sup>[12]</sup>。由表 4 可见,与对照相比,用各淋洗液培养的黑麦草叶绿素含量都有不同程度的增加,且总体差异显著( $P<0.05$ ),6 个淋洗液处理的叶绿素含量比对照提高了 27.9%~91.2%。

2.4 淋洗液处理对黑麦草重金属富集的影响

富集系数和转运系数可以作为评价植物对重金属富集能力和转移能力的指标:富集系数(BCFs)=植

表 1 淋洗液背景值  
Table 1 Background of sludge leachate

| 不同处理                                                        |    | 处理 I        | 处理 II       | 处理 III      | 处理 IV       | 处理 V        | 处理 VI       |
|-------------------------------------------------------------|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| N 含量/%、pH 值、<br>P 及矿质元素含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ | pH | 7.22±0.03c  | 7.56±0.11a  | 7.20±0.09c  | 7.14±0.15d  | 7.35±0.06b  | 7.23±0.05c  |
|                                                             | N  | 3.21±0.04d  | 9.34±0.24c  | 15.54±1.14b | 11.74±0.59c | 16.23±0.69b | 25.52±1.45a |
|                                                             | P  | 88.3±5.3e   | 122.3±8.1d  | 187.5±10.3c | 151.0±6.8d  | 211.4±15.8b | 241.2±10.3a |
|                                                             | K  | 315±7f      | 588±12e     | 652±9d      | 772±20c     | 840±15b     | 939±34a     |
|                                                             | Mg | 246±11e     | 484±24d     | 578±45c     | 510±10d     | 630±10b     | 823±31a     |
|                                                             | Na | 1350±10e    | 2034±19d    | 2659±19b    | 2432±45c    | 2745±87b    | 3377±109a   |
| 5 种重金属含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$                  | Ca | 623±19d     | 1014±13c    | 1553±23b    | 1135±56c    | 1577±48b    | 1789±25a    |
|                                                             | Cd | 0.83±0.06f  | 1.98±0.08c  | 2.31±0.17b  | 1.24±0.03e  | 1.44±0.01d  | 3.69±0.78a  |
|                                                             | Cr | 1.19±0.08e  | 1.47±0.11d  | 2.06±0.32b  | 1.16±0.09e  | 1.94±0.11c  | 2.37±0.36a  |
|                                                             | Cu | 18.23±2.75e | 43.97±5.37c | 59.67±4.10b | 28.18±2.49d | 40.74±2.23c | 76.88±4.73a |
|                                                             | Zn | 7.78±0.98e  | 239±9c      | 288±20b     | 212±22d     | 228±14cd    | 335±11a     |
|                                                             | Pb | 7.30±0.31e  | 31.82±6.29c | 49.96±5.18b | 21.68±3.03d | 47.28±5.01b | 93.67±7.10a |

注:同行数据中不同字母表示差异显著  $P<0.05$ 。

表 2 不同处理下的黑麦草萌发动态(个)

Table 2 Germination dynamic of *L. Perenne* under different treatments(numbers)

| 处理     | 播种后天数/d   |               |              |             |              |             |             |             |
|--------|-----------|---------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|        | 4         | 5             | 6            | 7           | 8            | 9           | 10          | 11          |
| CK     | 85±8.08a  | 116.7±3.28a   | 160±3.31a    | 158.7±5.21a | 161.3±4.50b  | 165.7±4.17a | 166.±3.12a  | 167.3±5.12a |
| 处理 I   | 71±3.51ab | 103±3.71b     | 149.7±2.33ab | 175.3±3.38a | 180±4.61a    | 181±5.56a   | 179.3±3.25a | 180±2.06a   |
| 处理 II  | 71±2.12ab | 105.7±2.33ab  | 155±6.24ab   | 165.3±6.64a | 167±2.33ab   | 173.7±3.48a | 171±2.56a   | 169±3.76a   |
| 处理 III | 70±4.21ab | 110±1.52ab    | 148±10.10ab  | 164.7±7.51a | 168.7±5.20ab | 173±2.08a   | 170.3±2.06a | 172.7±4.69a |
| 处理 IV  | 71±3.02ab | 107.3±2.96ab  | 150±3.21ab   | 162±3.51a   | 165±3.05ab   | 171±1.52a   | 173.7±4.13a | 170±3.25a   |
| 处理 V   | 74±5.08ab | 111.03±4.04ab | 140±5.33b    | 165±8.08a   | 172.3±5.70ab | 177±3.50a   | 175±4.25a   | 173±3.20a   |
| 处理 VI  | 60±3.21b  | 85.7±5.04c    | 93.7±2.93c   | 107±2.08b   | 135±7.63c    | 132.3±9.38b | 136.3±7.03b | 137±5.05b   |

注:同列数据中不同字母表示差异显著  $P<0.05$ 。

表 3 不同处理下黑麦草的地上生物量

Table 3 Aboveground biomass of *L. perenne* under different treatments

| 处理                     | CK           | 处理 I         | 处理 II        | 处理 III       | 处理 IV        | 处理 V         | 处理 VI        |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 地上干重/g·皿 <sup>-1</sup> | 0.138±0.080a | 0.133±0.031a | 0.145±0.034a | 0.141±0.041a | 0.135±0.020a | 0.136±0.062a | 0.106±0.013b |

注:同行数据中不同字母表示差异显著  $P<0.05$ 。

表 4 不同处理对黑麦草叶绿素含量的影响

Table 4 Effect of different treatments on chlorophyll content of *L. perenne*

| 处理     | 测定指标                       |                             |                            |
|--------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|        | 叶绿 a/mg·g <sup>-1</sup> FW | 叶绿素 b/mg·g <sup>-1</sup> FW | 总叶绿素/mg·g <sup>-1</sup> FW |
| CK     | 1.79±0.21c                 | 1.29±0.14c                  | 3.08±0.33e                 |
| 处理 I   | 2.47±0.11b                 | 1.68±0.16bc                 | 4.16±0.08cd                |
| 处理 II  | 2.96±0.16b                 | 2.04±0.15ab                 | 5.01±0.01b                 |
| 处理 III | 2.76±0.16b                 | 2.03±0.03ab                 | 4.79±0.19bc                |
| 处理 IV  | 3.53±0.15a                 | 2.35±0.11a                  | 5.89±0.15a                 |
| 处理 V   | 2.54±0.17b                 | 1.96±0.17ab                 | 4.51±0.31cd                |
| 处理 VI  | 2.53±0.13b                 | 1.41±0.11c                  | 3.94±0.22d                 |

注:同列数据中不同字母表示差异显著  $P<0.05$ 。

物体内的重金属含量/培养基中重金属含量;转运系数=植物地上部重金属含量/地下部重金属含量<sup>[13]</sup>。黑麦草地上部及根部重金属含量和富集系数见表 5 和表 6。各淋洗液培养的黑麦草根部与地上部 Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 的含量明显增加,这与淋洗液本身所含的重金属含量较高密切相关。除处理 I 外,其他 5 个处理在前期实验中由于 DTPA 的加入活化了污泥中的重金属,所以淋洗液中重金属的含量均高于处理 I,以处理 VI 含量为最高,因处理 VI 未种植物,也未放置隔层,且 DTPA 的浓度最高,缺少黑麦草和隔层的阻挡,淋洗出的重金属较多。黑麦草在处理 VI 淋洗液培养下,地上部和根部 Cd、Cu、Zn 和 Pb 含量达到最高,分别为 11.23 mg·kg<sup>-1</sup> 和 38.4 mg·kg<sup>-1</sup>、304.86 mg·

kg<sup>-1</sup> 和 767.25 mg·kg<sup>-1</sup>、1627.1 mg·kg<sup>-1</sup> 和 2704 mg·kg<sup>-1</sup>、278 mg·kg<sup>-1</sup> 和 997.5 mg·kg<sup>-1</sup>。不同处理下黑麦草地上部对 Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 的富集系数表现出差异性,同一种重金属在不同处理下富集系数不同,处理 I~VI 中 Cd 的富集系数为 60.86~88.47;Cr 为 68.69~109.93;Cu 为 71.49~90.78;Zn 为 97.14~132.82;Pb 为 45.35~62.27,不同处理间其富集系数无明显规律性,但总体来看,处理 VI 明显小于其他处理组。不同重金属在同一处理下富集系数也不同,由表 5 可见,同一处理下黑麦草地上部对 Zn 的富集系数为最大,对 Pb 的富集系数为最小。黑麦草根部分对 5 种重金属的富集系数在不同处理下规律性也不明显,但总的来看,Cd、Pb 的富集系数较大,Zn 的富集系数较小。从各重金属的转运系数来看,Zn 最大(为 0.54~0.77),Cu、Cr 和 Cd 次之(分别为 0.39~0.54、0.29~0.64 和 0.31~0.42),Pb 最小(为 0.19~0.30),说明 Zn 向地上部的转运能力最强,Pb 最弱,这和富集系数的结果相似。

修复后淋洗液中重金属元素的含量见表 7。同原淋洗液相比,各重金属的浓度都出现了不同程度的降低,黑麦草起到了一定的修复作用。通过多次刈割收获植物地上部分,可以移除更多的重金属。

3 讨论

多立安等以生活垃圾堆肥淋洗液培植无土草皮,结果表明,垃圾堆肥淋洗液中有有机质、全氮、有效磷及

表 5 不同处理下黑麦草地上部重金属含量和富集系数

Table 5 Heavy metal concentrations and BCF values of *L. perenne* shoots under different treatments

|                           | 处理     | Cd            | Cr            | Cu            | Zn             | Pb            |
|---------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 重金属含量/mg·kg <sup>-1</sup> | CK     | —             | —             | 60.25±8.05e   | 147.08±42.44c  | —             |
|                           | 处理 I   | 3.27±0.13d    | 4.52±0.26c    | 65.17±8.23e   | 51.67±23.99d   | 22.25±5.43e   |
|                           | 处理 II  | 7.19±0.46b    | 8.08±0.25b    | 190.92±19.22c | 1 348.48±42.2b | 99.08±6.3c    |
|                           | 处理 III | 10.02±0.54a   | 10.64±0.66a   | 223±27.81b    | 1558±43.59a    | 148.75±9.08b  |
|                           | 处理 IV  | 5.67±0.19c    | 5.09±0.11c    | 117.28±19.15d | 1 283.2±50.4b  | 49.17±11.53d  |
|                           | 处理 V   | 6.37±0.32bc   | 10.16±0.60a   | 184.92±18.02c | 1 377.2±58.32b | 131.67±15.06b |
| 重金属富集系数                   | 处理 VI  | 11.23±0.68a   | 8.14±0.21b    | 304.86±10.69a | 1 627.1±38.21a | 278±7.33a     |
|                           | 处理 I   | 78.59±1.98ab  | 75.96±3.77cd  | 71.49±4.71b   | 132.82±7.34a   | 60.95±4.76a   |
|                           | 处理 II  | 72.62±7.56ab  | 109.93±6.21a  | 86.84±4.49ab  | 112.84±8.83ab  | 62.27±7.54a   |
|                           | 处理 III | 86.75±4.76ab  | 103.30±3.13ab | 74.74±3.09ab  | 108.19±6.07ab  | 59.54±4.93a   |
|                           | 处理 IV  | 91.45±5.03a   | 87.75±5.19bc  | 83.23±6.50ab  | 121.05±5.82ab  | 45.35±5.01a   |
|                           | 处理 V   | 88.47±10.25ab | 104.74±1.48ab | 90.78±5.96a   | 120.80±10.56ab | 55.69±5.95a   |
|                           | 处理 VI  | 60.86±5.75b   | 68.69±9.19d   | 79.30±5.32ab  | 97.14±1.72b    | 59.35±1.54a   |

注:同列数据中不同字母表示差异显著  $P<0.05$ 。

表 6 不同处理下黑麦草根部分重金属浓度和富集系数

Table 6 Heavy metal concentrations and BCF values of *L. perenne* roots under different treatments

|                           | 处理     | Cd            | Cr           | Cu            | Zn            | Pb             |
|---------------------------|--------|---------------|--------------|---------------|---------------|----------------|
| 重金属含量/mg·kg <sup>-1</sup> | CK     | —             | —            | 110.32 ±7.32g | 251±10.14e    | —              |
|                           | 处理 I   | 10.63±0.65e   | 7.03±0.36e   | 138.83 ±8.67f | 96±6.19e      | 86.58±7.02f    |
|                           | 处理 II  | 21.83±0.88c   | 14.33±1.23c  | 427.08±11.64c | 1836±44.6d    | 348.08±12.72d  |
|                           | 处理 III | 27.43±0.64b   | 19.48±0.49b  | 499.5 ±26.68b | 2317±63.13b   | 502.83±22.31c  |
|                           | 处理 IV  | 13.65±0.51d   | 11.45±0.59d  | 260±21.39e    | 1677±38.67d   | 252.67±20.24e  |
|                           | 处理 V   | 18.35±0.65d   | 19.58±1.33b  | 340±16.86d    | 1988±119.49c  | 579±10.01b     |
| 重金属富集系数                   | 处理 VI  | 38.40±0.55a   | 28.56±1.27a  | 767.25±37.84a | 2704±109.72a  | 997.5±21.7a    |
|                           | 处理 I   | 256.14±10.13a | 118.15±6.11c | 152.30±7.12c  | 246.78±15.27a | 237.20±8.96a   |
|                           | 处理 II  | 220.50±8.62bc | 194.96±7.01b | 194.25±8.31a  | 153.64±6.42b  | 218.78±11.62ab |
|                           | 处理 III | 237.48±6.58ab | 189.12±9.42b | 167.42±6.13bc | 160.90±5.77b  | 201.29±5.90b   |
|                           | 处理 IV  | 220.16±6.48bc | 197.41±8.02b | 184.52±6.50ab | 158.20±5.29b  | 233.09±10.86ab |
|                           | 处理 V   | 254.86±7.62a  | 201.85±6.11b | 166.91±7.85bc | 174.38±8.08b  | 244.92±13.01a  |
|                           | 处理 VI  | 208.13±7.05c  | 241.01±7.31a | 199.59±5.77a  | 161.43±13.30b | 212.98±9.20ab  |

注:同列数据中不同字母表示差异显著  $P<0.05$ 。

其他营养元素含量显著高于对照土壤淋洗液,能够充分满足草坪植物生长需要<sup>[9]</sup>。本研究的结果也证实,污泥经 DTPA 协同草坪植物修复后所得淋洗液含有丰富的矿质营养,能够满足植物正常生长需求,主要表现在种子萌发数增多、生物量增加以及叶绿素含量上升。草坪草颜色是评价草坪质量的一个重要指标<sup>[14]</sup>,直观效果上淋洗液培植的黑麦草颜色深绿,而对照营养液培养的黑麦草叶片颜色黄绿。污泥淋洗液在提高黑麦草叶绿素含量方面效果显著,这有利于黑麦草保持较好的绿度<sup>[15]</sup>。

络合剂的使用会对植物产生毒害作用,如引起植物的黄化、萎蔫,甚至是死亡。DTPA 是生物难降解络合剂,通常会对植物产生毒害效应,并且 DTPA 及金属-DTPA 络合物很难被土壤微生物降解,其在土壤中的存在具有持久性,随灌溉或者降水作用会使活化的重金属向下渗滤,对地下水造成潜在威胁。Kos 和 Leštan<sup>[16-17]</sup>的研究指出,在土壤下层设置隔层可以阻隔重金属向下渗滤,由于前期实验草坪植物的吸收及隔层的阻挡不仅降低了淋洗液的重金属的含量,还可能吸附了一些抑制植物生长的其他物质如残留的

表7 修复后淋洗液中各重金属元素含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 7 Heavy metal contents in leachate after remediation( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 处理     | Cd         | Cr         | Cu           | Zn            | Pb           |
|--------|------------|------------|--------------|---------------|--------------|
| 处理 I   | 0.71±0.05e | 1.09±0.11c | 16.71 ±1.23d | 6.64±0.99d    | 6.59±0.43d   |
| 处理 II  | 1.77±0.09c | 1.28±0.06c | 39.07±1.84c  | 210.27±17.2c  | 28.64±2.53bc |
| 处理 III | 2.01±0.04b | 1.80±0.10b | 53.78±5.33b  | 253.29±13.59b | 45.09±4.58b  |
| 处理 IV  | 1.08±0.11d | 1.02±0.07c | 25.09±1.41d  | 184.95±8.4c   | 19.55±1.53c  |
| 处理 V   | 1.25±0.06d | 1.69±0.11b | 36.32±3.95c  | 198.14±5.32c  | 42.24±5.26b  |
| 处理 VI  | 3.44±0.18a | 2.18±0.08a | 70.73±9.69a  | 307.21±18.21a | 86.91±8.53a  |

注:同列数据中不同字母表示差异显著  $P<0.05$ 。

DTPA 等,本实验除处理 VI 外其余组黑麦草的生长与 Hoagland's 营养液培养的黑麦草差异不大甚至要更好,从植物生长指标来看,处理 II~V 淋洗液中的 DTPA 残留浓度不足以对黑麦草的生长产生影响。

DTPA 作用下淋洗液中有效态重金属的含量明显提高,不论种植植物与否,均增加了重金属的向下渗滤。利用此淋洗液培养的黑麦草地上部和根部 Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 含量较高,显著高于未加 DTPA 的处理 I,且根部含量要远远高于地上部。杨卓等研究表明,在土壤 Cd、Zn 和 Pb 复合污染处理条件下,黑麦草对 Zn 表现出富集植物的特性规律,但对 Cd、Pb 的吸收没有呈现独特特点,并且对 3 种重金属的吸收并没有出现复合效应<sup>[18]</sup>。本研究结果表明,黑麦草地上部和根部对 Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 的富集系数在不同处理间无明显规律性,但同一处理下,黑麦草地上部对不同重金属富集系数表现为 Zn 最大,Pb 最小,根部则表现为 Cd、Pb 较大,Zn 较小。各重金属转运系数表现为,Zn 的转运系数最大,Pb 最小,说明 Zn 从根向地上部转移的能力最强,Pb 最弱;但各重金属的转运系数均小于 1,这和根中各重金属含量远高于地上部的结果一致。孟昭福等研究也发现污泥中的 Cd、Zn、Cu 较易向地上部转移,而 Pb、Ni 则不易向地上部转移<sup>[19]</sup>,可能是 Cd、Zn、Cu 在根际作用下的活化程度较高,呈现出易于被植物吸收的状态<sup>[20]</sup>。当然,植物吸收重金属的效率还与重金属生物毒性有关<sup>[21]</sup>,Hakanson 计算的 7 种重金属毒性系数参考值为  $\text{Hg}>\text{Cd}>\text{As}>\text{Pb}>\text{Cu}>\text{Cr}>\text{Zn}$ ,其中 Zn 的毒性要低于 Cd、Pb、Cu,因此,Cd、Pb、Cu 对植物的损害比 Zn 更能影响植物的生长及对重金属的耐受和吸收能力。所以,和其他元素相比,Zn 更易被黑麦草吸收和富集,在检测的黑麦草中 Zn 的地上部富集系数以及转运系数均为最大。研究表明,植物对 Cd 的富集主要是通过植物细胞的吞饮或者是将 Cd 转化为有机结合态存储于体内;而

Pb 的富集大多是通过植物细胞间隙(质外体)中的沉积作用<sup>[21]</sup>,这可能也是导致黑麦草对不同重金属富集差异的原因。修复后的淋洗液中各重金属元素含量与修复前相比有不同程度的减少,虽然各重金属含量仍未达到淋洗液安全排放的标准,但一定程度上降低了淋洗液中重金属含量,使淋洗液得到了实际利用并培育出生长良好的黑麦草,如果设置淋洗液的重复利用以及增加黑麦草的种植量或许可以达到更好的修复和利用效果。

#### 4 结论

将风干污泥修复后的淋洗液加以利用,进行黑麦草无土培植,显著提高了黑麦草的叶绿素含量并且提高了种子萌发以及生物量(除处理 VI 外)。淋洗液培养的黑麦草对 Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 均有不同程度的富集作用,根部的富集要高于地上部,5 种重金属相比,Zn 从根部向地上部转运能力较强。黑麦草对风干污泥淋洗液的修复具有一定的实际应用价值,特别是对淋洗液中 Zn 的修复。污泥淋洗液的回收利用不仅减轻了环境危害,而且可以降低草皮培植成本,实现养分的再循环,有利于农业、环境和社会的可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 刘强,陈玲,黄游,等.施用污泥堆肥对土壤环境及高羊茅生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 199-203.  
LIU Qiang, CHEN Ling, HUANG You, et al. Effects of application of sewage sludge compost on soil environment and *Festuca arundinacea* Schreb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 199-203.
- [2] 戴亮,任珺,陶玲,等.污泥施用对土壤及小麦生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 362-368.  
DAI Liang, REN Jun, TAO Ling, et al. Effects of sewage sludge application on soil and physiological property of *Triticum aestivum*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 362-368.
- [3] 李广涛,周光,王影影,等.污泥农用对土壤环境的影响[J]. 四川环

- 境, 2011, 30(5):75-79.
- LI Guang-tao, ZHOU Guang, WANG Ying-ying, et al. Effects of sewage sludge application in agriculture on soil environment[J]. *Sichuan Environment*, 2011, 30(5):75-79.
- [4] 于芳芳, 常智慧, 韩烈保. 城市污泥和污泥堆肥在草坪的利用研究进展[J]. 草业学报, 2011, 20(5):259-265.
- YU Fang-fang, CHANG Zhi-hui, HAN Lie-bao. General situation of studies on grassland application of municipal sludge compost[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(5):259-265.
- [5] 赵晓莉, 徐德福, 李泽宏, 等. 城市污泥的土地利用对黑麦草理化指标和品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(S1):59-63.
- ZHAO Xiao-li, XU De-fu, LI Ze-hong, et al. Influence of municipal sludge and application to ryegrass physical and chemical properties and quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(S1):59-63.
- [6] 黄庆, 林小明, 柯玉诗, 等. 污泥农用对药用植物紫花茉莉品质和土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):193-196.
- HUANG Qing, LIN Xiao-ming, KE Yu-shi, et al. Effects of agricultural utilization of sewage sludge compost on the officinal quality of *Mirabilis jalapa* L. and soil environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):193-196.
- [7] 丁竹红, 胡忻, 尹大强. 螯合剂在重金属污染土壤修复中应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2):777-782.
- DING Zhu-hong, HU Xin, YIN Da-qiang. Application of chelants in remediation of heavy metals-contaminated soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2):777-782.
- [8] Andrew Hong P K, Li C, Banerji S K, et al. Feasibility of metal recovery from soil using DTPA and its biostability[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 94(3):253-272.
- [9] 多立安, 廉菲, 赵树兰. 生活垃圾堆肥淋洗液培植无土草皮的生态特征[J]. 生态学报, 2007, 27(12):5050-5056.
- DUO Li-an, LIAN Fei, ZHAO Shu-lan. Ecological characteristics of soilless sods cultivated by leachate from a municipal solid waste compost[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5050-5056.
- [10] 华东师大生物系植物生理教研组. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984:88-90.
- East China Normal University Department of Biology Plant Physiology Research Group. Experimental guide of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1984:88-90.
- [11] O'Brien T A, Barker A V. Evaluation of ammonium and soluble salts on grass sod production in compost:II. Delaying seeding after compost application[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(1-2):77-85.
- [12] 李艳霞, 赵莉, 陈同斌. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生长的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(6):797-801.
- LI Yan-xia, ZHAO Li, CHEN Tong-bin. The municipal sewage sludge compost used as lawn medium[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6):797-801.
- [13] 徐卫红, 王宏信, 李文一, 等. 重金属富集植物黑麦草对 Zn 的响应[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3):33-36.
- XU Wei-hong, WANG Hong-xin, LI Wen-yi, et al. Growth and uptake response of hyperaccumulator ryegrass to Zn stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3):33-36.
- [14] 付华, 周志宇, 张洪荣, 等. 施用污泥对黑麦草生育及其元素含量的影响[J]. 草地学报, 2002, 10(3):167-172.
- FU Hua, ZHOU Zhi-yu, ZHANG Hong-rong, et al. The effects of application of sewage sludge on the growth and element contents of *Lolium perenne*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10(3):167-172.
- [15] Barker A V. Evaluation of composts for growth of grass sods[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(11-12):1841-1860.
- [16] Kos B, Leštan D. Induced phytoextraction/soil washing of lead using biodegradable chelate and permeable barriers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(3):624-629.
- [17] Kos B, Leštan D. Soil washing of Pb, Zn and Cd using biodegradable chelator and permeable barriers and induced phytoextraction by *Cannabis sativa*[J]. *Plant and Soil*, 2004, 263:43-51.
- [18] 杨卓, 王伟, 李博文, 等. 高羊茅和黑麦草对污染土壤 Cd, Pb, Zn 的富集特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2):83-87.
- YANG Zhuo, WANG Wei, LI Bo-wen, et al. Study on characteristics of *Lolium multiflorum* and *Festuca arundinacea* absorbing and accumulating cadmium, lead and zinc from contaminated soil with these metals[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2):83-87.
- [19] 孟昭福, 张增强, 张一平, 等. 几种污泥中重金属生物有效性及其影响因素的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1):115-118.
- MENG Zhao-fu, ZHANG Zeng-qiang, ZHANG Yi-ping, et al. Bioavailability of heavy metals and affecting factors in sewage sludge[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1):115-118.
- [20] 李琼, 徐兴华, 左余宝, 等. 污泥农用对微量元素在小麦-玉米轮作体系中的积累及转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10):2042-2049.
- LI Qiong, XU Xing-hua, ZUO Yu-bao, et al. Effects of biosolid on the accumulation and transfer of trace elements in soil-wheat/maize system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10):2042-2049.
- [21] 牛之欣, 孙丽娜, 孙铁珩. 水培条件下四种植物对 Cd、Pb 富集特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2):261-268.
- NIU Zhi-xin, SUN Li-na, SUN Tie-heng. Enrichment characteristics of Cd and Pb by four kinds of plant under hydroponic culture[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2):261-268.